УДК 681.52:681.3.26

Л.И. Цвиркун, И.В. Кмитина
Национальный горный университет Украины, г. Днепропетровск, Украина
Kmitina@i.ua

Обоснование параметров Ethernet-сети с помощью модели очереди для передачи видеоинформации

Разработана математическая модель очереди кадров на коммутаторе, рассчитаны временные параметры очереди для Ethernet-сети. Сделаны обоснования, что сеть с выбранными характеристиками не будет вносить значительных задержек на получение видеоинформации диспетчером угольной шахты.

Введение

На сегодняшний день остается актуальной проблема аварийной безопасности в угольной промышленности, а именно противоаварийной системы защиты шахт. Энергетическая сфера деятельности является одной из наиболее приоритетных областей для каждого государства. Любые возникающие аварийные ситуации влекут за собой финансовые, а порой, что значительно хуже, человеческие потери.

Цель любой системы безопасности – предупреждение развития аварийных ситуаций. Постоянный мониторинг процессов добычи и обогащения полезных ископаемых является одной из них.

Предлагаемая в данной статье компьютерная сеть системы непрерывного автоматизированного видеоконтроля конвейерных линий угольной шахты является инновационной и перспективной. Информация о состоянии контролируемых элементов периодично поступает на пульт диспетчера. После анализа полученных данных диспетчер, в зависимости от ситуации, принимает то или иное решение, направленное на предотвращение аварийной ситуации. Своевременность и достоверность предоставляемой информации являются основными решающими факторами для данной системы.

Постановка задачи

При построении структурной схемы системы видеоконтроля использовались: видеокамеры, блоки управления конвейером, контроллеры связи, ПК связи, веб-сервер, коммутатор и ПК пользователей, в том числе и диспетчера (рис. 1). Представленная схема также предусматривает наличие маршрутизатора для удаленной передачи видеоинформации. В качестве среды передачи данных в угольной шахте была выбрана CAN-шина, имеющая высокую помехоустойчивость, что обусловлено особенностью ее физической реализации. Шина также характеризуется повышенной защищенностью от электрических и информационных перегрузок. Протяженность линии связи в условиях применения предлагаемой автоматизированной системы не превышает 2500 м, соответственно скорость передачи данных (по спецификации CAN для данной длины) составляет не менее 20 Кбит/с [1]. А в качестве среды передачи данных на поверхности шахты была выбрана Fast Ethernet сеть.

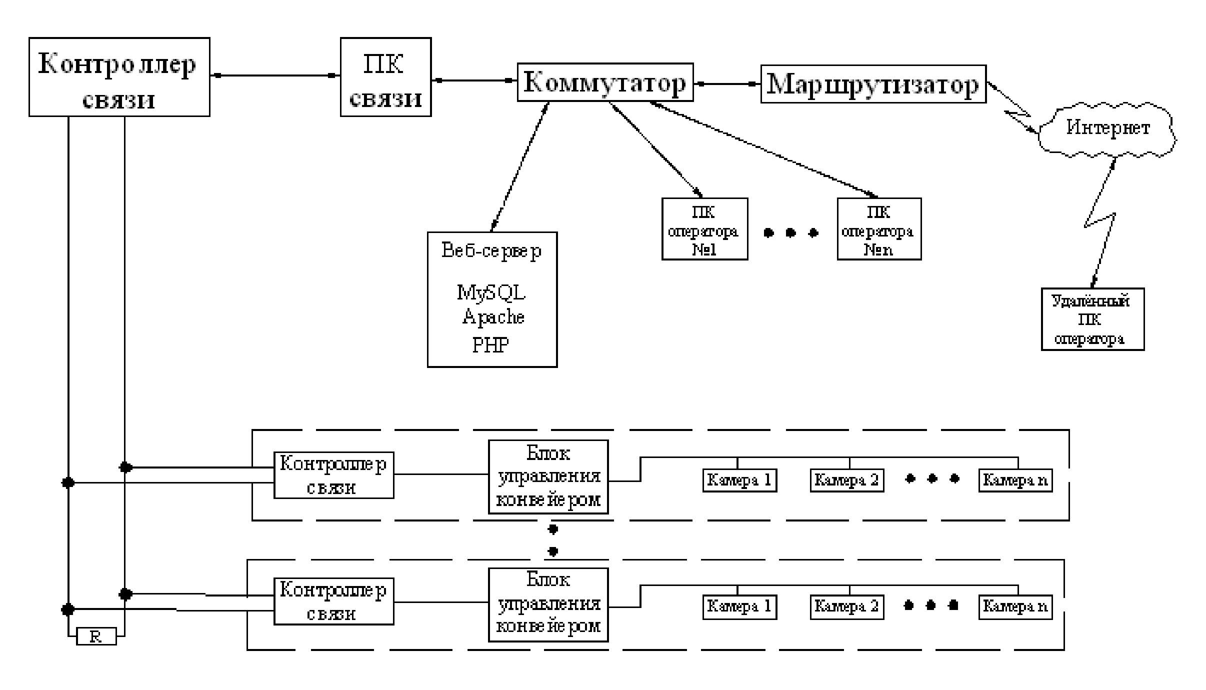


Рисунок 1 – Структурная схема системы видеоконтроля
конвейерных линий угольной шахты

Необходимо построить математическую модель очереди фреймов на коммутаторе с заданными входными данными, проследить динамику и характер загрузки Ethernet канала связи. Выбрать оптимальные параметры передачи видеоизображений.

Основная часть

На МАС-подуровне для всех скоростей передачи Ethernet структура фрейма практически одинакова. Поле фрейма «Данные и биты заполнения» имеет произвольную длину в пределах от 65 до 1500 байт [2]. Для отправки запроса на сервер достаточно будет одного фрейма.

На базе реальных экспериментальных исследований было получено усредненное значение объема передаваемого изображения в формате JPG. Эта величина зависит от ряда факторов, таких как расстояние от камеры до контролируемого объекта, его освещенность и качество цветопередачи передаваемого изображения (2, 8 бит для черно-белого; 12, 16, 24 бит – для цветного). В условиях повышенной запыленности (зона прямой видимости значительно снижена) угольных шахт наиболее оптимальным, с точки зрения информативности и восприятия диспетчером предоставляемой информации, будет выбор уровня качества цветопередачи 24 бит. Таким образом, при ответе клиенту необходимо переслать информацию с сервера объемом порядка 20 Кбайт.

Была принята усреднённая длина данных в кадре размером 750 байт. Объем полезной информации 20 Кбайт или 20000 байт. Так как максимальная длина передаваемых данных в кадре составляет 1500 байт, то в рассматриваемом случае необходимо 14 кадров для передачи ответа клиенту от сервера. Если же принять усредненную длину передаваемой информации, то посылка увеличится в 2 раза – 28 кадров.

При разработке наземной шахтной сети был выбран высокоскоростной Ethernet с пропускной способностью 100 Мбит/с на основе неэкранированной витой пары 5 категории. С учетом топологии сети применяется определенная спецификация, представленная в табл. 1.

Таблица 1 – Технология Fast Ethernet

Характеристика	100Base-TX
Тип кабеля	Высококачественная неэкранированная витая пара 5 категории
Максимальная длина сегмента	100 м
Максимальная общая длина	500 м при использовании дуплексного режима, 250 м – полудуплексного
Максимальное количество узлов в сегменте	2
Топология	Звездообразная физическая и шинная логическая
Поддержка дуплексного режима	Да

Необходимо обосновать выбор сетевого устройства, соединяющего между собой серверы и конечные станции сети. Таковыми могут быть концентраторы или коммутаторы.

Если взять концентратор класса II с портами TX/FX, то необходимо определить, будет ли задержка находиться в допустимых пределах и сеть останется работоспособной. Необходимо вычислить суммарное двойное время прохождения сигнала по сети. Для этого сначала выделяется максимальный путь. Если взять ПК связи, веб-сервер и один ПК оператора, то этот путь будет до 300 м. Если же добавить еще одну станцию оператора, то путь увеличится на 100 м и так далее при каждом добавлении дополнительных узлов.

Известны следующие максимальные двойные задержки компонентов сети FastEthernet:
– 92 битовых интервала для концентратора класса II с портами TX/FX;
– 111,2 битовых интервала для сегмента на кабеле 5 категории;
– 100 битовых интервала для двух абонентов концентратора с портами TX/FX.

Суммарная задержка должна быть меньше, чем 512 битовых интервалов. Но стандарт IEEE802.3u рекомендует оставлять запас в пределах 1 – 4 битовых интервалов для учета кабелей внутри соединительных шкафов и погрешностей измерения [3].

Для варианта сети с концентратором, ПК связи и веб-сервером суммируются все задержки, что составляет 414,4 битовых интервала. Эта величина допустима и сеть будет полностью работоспособна.

Если же для первого варианта добавить две рабочие станции, то суммарная задержка сети составит 736,8 битовых интервала. Такая сеть неработоспособна.

Анализируя вышеперечисленное, можно сделать вывод, что применение концентратора является неприемлемым для построения реализуемой сети.

Коммутаторы серии Cisco 2900XL являются наиболее приспособленными для выполнения функций устройств уровня доступа в коммутируемой сети на 10/100 Мбит/с. В эту серию входят модели в двух основных исполнениях – 12- и 24-портовые версии. Обе версии характеризуются средней производительностью объединительной платы (3Гбит/с) и скоростью перенаправления фреймов PPS ($3 \cdot 10^6$), а также поддерживают аналогичный набор средств: виртуальные локальные сети, управление устранением заторов, защита портов, DHCP, DNS. Кроме того, все коммутаторы

2900XL поддерживают метод централизованного управления и настройки конфигурации группы коммутаторов с использованием одного IP-адреса, называемый группированием [2].

С учетом количества подключаемых устройств (более 12) к коммутатору была выбрана 24-портовая версия. Модели коммутаторов, которые подходят для сети с витой парой: 2924XL, 2924C-XL, 2924M-XL [3].

Выбранный коммутатор соответствует характеристикам кабельной системы Ethernet и имеет относительную приемлемую цену.

В качестве способа организации доступа для сети Ethernet применяется многостанционный доступ с контролем несущей и обнаружением коллизий CSMA/CD. При передаче фрейма компьютер в сети Ethernet принимает передаваемые им же самим данные фрейма (по меньшей мере, первые 64 байт) просто для определения того, не произошла ли коллизия с фреймом, передаваемым другим компьютером. Принимать остальные данные своего фрейма нет особого смысла. Время, в течение которого первый байт фрейма достигает всех прочих компьютеров в сети, называется задержкой распространения. Задержка распространения стандартной сети Ethernet со скоростью передачи 100 Мбит/с составляет не более 5,12 мкс, это значит, что такая допустимая продолжительность распространения сигнала начинает серьезно сказываться на выборе максимальной длины сегмента. Длина кабеля в логическом сегменте сети не должна превышать рекомендуемую максимальную длину, в противном случае возникает значительное количество запоздалых коллизий [2].

Известно, что сетевые устройства второго уровня делят сеть на домены коллизий. Следовательно, использование в компьютерной сети коммутаторов само собой является методом устранения коллизий. При подключении к каждому порту коммутатора по одному узлу можно исключить возникновение коллизий. Кроме того, при таком подключении пропускная способность канала увеличивается в 2 раза, так как используется дуплексный режим передачи данных. Таким образом, максимально предельная скорость передачи данных по стандарту 100Base-TX составит 200 Мбит/с.

В связи с тем, что в сети используется один коммутатор и максимальное число пользователей не превышает 10, это позволяет обеспечить отдельное соединение конечных станций с портами коммутатора. Согласно правилу 5 – 4 – 3 к одному порту коммутатора можно подсоединить только 5 сегментов и на трех из них можно подключать рабочие станции [2]. В противном случае не все рабочие станции смогут прослушивать коллизии, сеть функционирует неэффективно, а суммарная задержка распространения сигнала в прямом и обратном направлениях не превышает определенных пределов.

Представлен расчет модели очередей (по теории массового обслуживания). Простейшая система очередей показана на рис. 2. Центральный элемент этой системы – сервер, предоставляющий некоторый сервис объектам. Объекты из некого набора объектов поступают на систему, где они должны обслуживаться. Если сервер свободен, то объект обслуживается немедленно. В противном случае поступающий объект добавляется к очереди. Когда сервер завершает обслуживание объекта, объект отправляется далее. Если в очереди существуют объекты, то один из них немедленно отправляется на сервер [3].

На рис. 2 также показаны наиболее важные параметры, связанные с моделью очередей. Объекты поступают на обслуживание с некоторой средней скоростью λ (число поступающих объектов в секунду).

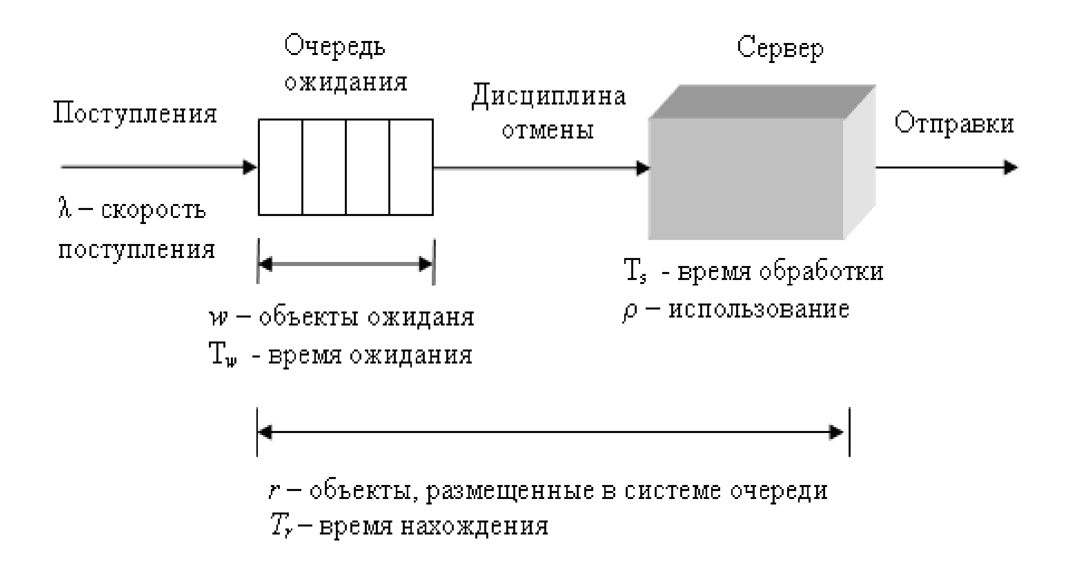


Рисунок 2 – Структура системы с очередью и параметры очереди с единственным сервером

В представленной работе объектом является фрейм (кадр), а сервером – коммутатор.

Рассмотренная модель имеет обозначение М/М/1, принятое нотацией Кендалла, что означает модель очереди с одним сервером (коммутатором) с пуассоновским временем поступления и экспоненциальным распределением времени обслуживания [3].

При этом используются следующие переменные:

w – среднее число кадров, ожидающих обработки в очереди в любой данный момент времени;

T_w – среднее время ожидания для кадра (по всем поступающим кадрам, включая те, которые вообще не находились в очереди);

T_s – среднее время обслуживания, за которое коммутатор обрабатывает входящие фреймы, это интервал времени между поступлением фрейма на коммутатор и отправкой его;

ρ – время занятия коммутатора (использование), измеренное за некоторый интервал времени;

r – среднее число кадров, размещенных в системе, включая кадры, подлежащие обслуживанию и ожидающие обслуживание;

T_r – среднее время, которое кадр проводит в системе (ожидая и получая сервис) или средняя продолжительность обслуживания [3].

Если предположить, что пропускная способность очереди бесконечна, тогда ни один из кадров не будет утерян в сети; кадры будут задерживаться только до того времени, как их смогут обслужить. По мере увеличения скорости поступления кадров увеличивается использование очереди и вместе с ней возрастает перегрузка. Очередь становится длиннее, увеличивая время ожидания. При $\rho = 1$ коммутатор насыщается, работая все 100 % времени. Считается, что при уровне использования меньше 100 % коммутатор может справляться с входящим потоком, поэтому средняя скорость отправки кадров равна средней скорости их поступления. Как только коммутатор насыщается, работая 100 % всего времени, скорость отправки остается постоянной вне зависимости от значения скорости поступления кадров. Поэтому

теоретический максимум скорости поступления фреймов, который может обрабатывать система, равен:

$$\lambda_{max} = \frac{1}{T_s} = 3 \cdot 10^6 \text{ кадров/с},$$

где Ts – время обработки кадра. Так как выше был обоснован и выбран коммутатор серии Cisco Catalyst 2900, то для него это время составляет 0,33 мкс [2].

Однако очереди становятся очень большими по мере насыщения системы, возрастая неограниченно при $\rho = 1$. На практике такие параметры, как время отклика или размеры буферов, обычно ограничивают скорость поступления кадров для отдельного коммутатора уровнем 70 – 90 % от теоретического максимума [3].

Зная принципы работы Ethernet-протокола, можно отметить, что распределение времени обслуживания подчиняется экспоненциальному закону. Наихудшая производительность имеет место при этом распределении времени обслуживания [3].

Используя формулы для очередей с одним коммутатором, рассчитываются следующие параметры:

$$r = \frac{\rho}{1-\rho} = 2{,}88 \text{ кадров},$$

где $\rho = \lambda \cdot T_S$, величина λ взята как 75 % от максимального значения.

Среднее время, которое объект проводит в системе:

$$T_r = \frac{T_S}{1-\rho} = 1{,}28 \cdot 10^{-6} \text{ с}.$$

Среднеквадратичное отклонение параметра r:

$$\sigma_r = \frac{\sqrt{\rho}}{1-\rho} = 3{,}35.$$

Среднее число объектов, ожидающих обслуживания:

$$w = \frac{\rho^2}{1-\rho} = 2{,}14 \text{ кадра}.$$

Среднее время ожидания (включая объекты, которые должны ожидать и объекты со временем ожидания 0):

$$T_w = \frac{\rho \cdot T_S}{1-\rho} = 0{,}95 \cdot 10^{-6} \text{ с}.$$

Среднеквадратичное отклонение параметра T_r:

$$\sigma_{Tr} = \frac{T_S}{1-\rho} = 1{,}28 \cdot 10^{-6}.$$

Таким образом, были получены некоторые параметры очередей кадров с одним коммутатором, а именно:

– 1,28 мкс – среднее время, которое кадр проводит в системе;

– 0,95 мкс – среднее время ожидания (включая кадры, которые должны ожидать и кадры со временем ожидания 0).

Рассчитано время нахождения кадра в очереди ожидания:

– 10 конечных станций, подключенных к одному коммутатору, одновременно отправляют запросы на сервер, среднее время ожидания составляет 0,95 мкс·10·1кадр = 9,52 мкс;

– сервер отправляет ответ рабочим станциям, на коммутаторе среднее время ожидания составляет 0,95 мкс·10·28 кадра = 266,44 мкс;

– ПК связи передает видеоинформацию на сервер, время ожидания 0,95 мкс·1·28 кадра = = 26,64 мкс.

Следовательно, при наихудшем варианте, когда одновременно происходят все вышеперечисленные обмены информацией, суммарное время очереди на коммутаторе составляет 302,6 мкс.

Чтобы определить полное время ожидания пользователем ответа на запрос к веб-серверу, необходимо также учитывать временную задержку на распространение сигнала по сети. Эта задержка рассчитывается по формуле:

$$T_Z = \frac{V}{v},$$

где V – объем передаваемой информации, бит;

v – пропускная способность канала передачи данных, бит/с.

Так как объемы ответов и запросов согласованы выше и определена пропускная способность, то имеем следующие задержки:

– время распространения запроса 122,08 мкс;

– время распространения ответа 1740,32 мкс;

– суммарное время 1862,4 мкс.

Учитывая задержку распространения стандартной сети Ethernet со скоростью передачи 100 Мбит/с, которая составляет 5,12 мкс, получено время ожидания ответа пользователем на запрос веб-серверу при 10 пользователях 2170,11 мкс.

Для анализа времени ожидания ответа от количества пользователей были выполнены расчеты для 3, 5, 7 и 10 пользователей (рис. 3).

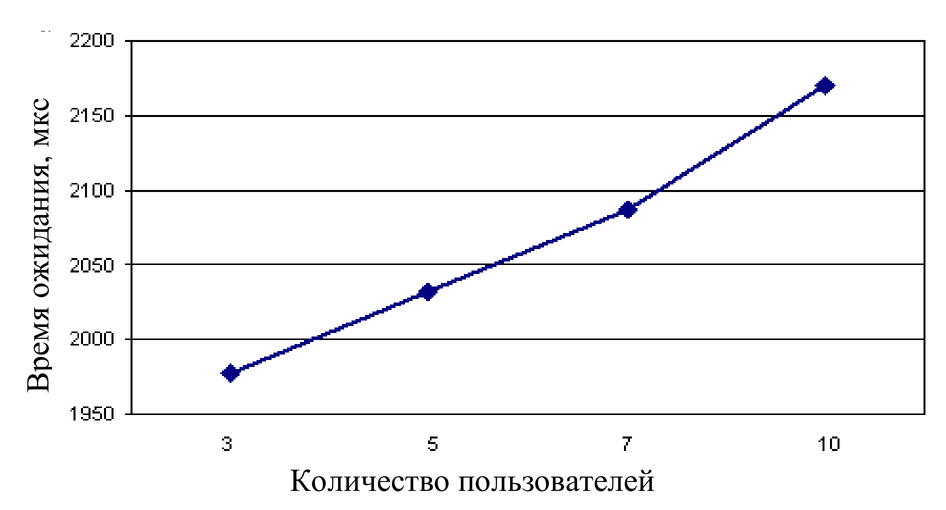


Рисунок 3 – Зависимость времени ожидания ответа пользователем от количества рабочих станций

Полученные временные задержки являются допустимыми. Такая сеть функционирует эффективно.

Выводы

В данной статье приводится обоснование параметров Ethernet-сети для применения в условиях угольной шахты.

Установлено, что при использовании коммутатора серии Cisco 2900XL не происходит перегрузка сети. В отличие от случая применения концентратора, где вносятся значительные задержки при передаче информации, коэффициент загрузки канала превышает допустимые пределы, следовательно, реализуемая сеть не будет работоспособной. Очевидным положительным фактором при использовании коммутатора является перспектива расширения сети за счет подключения дополнительных пользователей.

Представлен расчет модели очередей (по теории массового обслуживания) на коммутаторе и определено суммарное время нахождения в очереди кадров.

Определены зависимости времени ожидания ответа пользователем от количества подключенных станций к сети.

Приведенные расчеты позволяют создать Ethernet-сеть с заранее известными приемлемыми параметрами для передачи видеоизображений.

Литература

1. Ткачев В.В., Поперечный Д.А., Надточий В.В. Исследование возможности применения полевой шины CAN протокола CANOpen для создания систем передачи информации в шахтных условиях // Сборник научных трудов НГУ. – Днепропетровск: НГУ, 2004. – Т. 2. – № 19. – С. 50-59.
2. Хилл Б. Полный справочник по Cisco: Пер. с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2008. – С. 48-59, 254-259.
3. Столлингс В. Компьютерные сети, протоколы и технологии Интернета. – СПб.: БХВ – Петербург, 2005. – С. 225-262.
4. Цвиркун Л.И., Козяр Я.В, Кмитина И.В. Моделирование системы автоматизированного видеоконтроля технологических процессов угольной шахты // Автоматизация: проблемы, идеи, решения: Мат. междунар. научн.-техн. конф. – Севастополь. – 2005. – С. 70-72.

Л.І. Цвіркун, І.В. Кмітіна
Обґрунтування параметрів Ethernet-мережі за допомогою моделі черги для передачі відеоінформації
Розроблена математична модель черги кадрів на комутаторі, розраховані часові параметри черги для Ethernet-мережі. Зроблені обґрунтування, що мережа з обраними характеристиками не вноситиме значних затримок на отримання відеоінформації диспетчером вугільної шахти.

L.I. Tsvirkun, I.V. Kmitina
Justification of Ethernet Parameters by Application of Model of Queue for Videoinformation Transfer
The mathematical model of frame queue on a switch is developed, the temporal parameters of queue for an Ethernet are calculated. The grounds are done, that a network with the chosen descriptions will not bring in the considerable delays on the receipt of video by the controller of coal mine.

Статья поступила в редакцию 17.07.2008.